

昭和基地で観測される 午前側 Pc5 地磁気脈動の偏波主軸方向の特異性

加藤 賢一*

Anomaly in the Orientation Angle of Morning Side Pc5 Geomagnetic Pulsations Observed at Syowa Station

Ken-ichi KATO*

Abstract : Pc5 geomagnetic pulsations observed in local morning at Syowa Station (SYOW) often show anomalous polarization characteristics in the horizontal plane. The sense of polarization of Pc5 pulsations observed at SYOW is the same as that at the other stations in the southern polar region. The orientation of the main polarization axis at SYOW points to geomagnetic north, that at other stations to the geomagnetic northeast. The purpose of this study is to explain the anomaly in the orientation of the polarization axis of morning side Pc5 pulsations at SYOW and four stations near SYOW, two of which are located tens of km away from SYOW and hundreds of km from the other two antarctic stations. The results are as follows: 1) The anomaly in the orientation of polarization axis of Pc5 pulsations is large at SYOW with no local time dependence. 2) The anomaly is related to the difference in the phase of the H and the D components. It is especially affected by the phase variations of the D component. 3) The phase of the H component of Pc5 pulsations at SYOW shows about 10° lead and that of the D component about 30° lag. It is inferred that the origin of the anomaly of the orientation of polarization axis of Pc5 pulsations at SYOW is caused by a local effect due to inhomogeneous electric currents induced underground around SYOW.

要旨: 南極昭和基地で観測される午前側 Pc5 地磁気脈動の H - D 成分間の偏波は顕著な特異性を示す。他の観測点の偏波主軸が一般的に磁気北東方向を指すのに対し、昭和基地の偏波主軸は磁気北方向を指す。本研究では、昭和基地を含め昭和基地から数 10 km 離れた二つの観測点と数 100 km 離れた二つの観測点で同時観測された地磁気変化データから、昭和基地で現れる午前側 Pc5 脈動の偏波主軸方向の特異性を明らかにすることが目的である。その結果、以下のことが明らかとなった。1) 午前側 Pc5 脈動の偏波主軸方向の特異性は、昭和基地近傍で顕著に現われ、時刻に依存しない。2) その特異性は H - D 成分間の振幅比よりも位相差の変化の影響を受けている。特に D 成分の位相変化による。3) 昭和基地で現われる位相変化は、 H 成分で 10° の進み、 D 成分で 30° の遅れを持つ。これらの特性を持つ可能性として、昭和基地で観測される Pc5 脈動の偏波主軸方向の特異性の原因は、昭和基地近傍における不均質な地下誘導電流の局所的な効果によるものと推論される。

* 東海大学工学部航空宇宙学科. Department of Aeronautics and Aerospace, Tokai University, Kitakaname 1117, Hiratsuka 259-12.

1. はじめに

本研究では、南極昭和基地で観測される 150–600 秒の周期を持つ Pc5 地磁気脈動 (以下では Pc5 脈動とする) の偏波主軸方向の特異性を検討する。

IWABUCHI *et al.* (1980) は昭和基地とその周辺他観測点の Pc5 脈動の偏波特性の比較を行い、昭和基地で観測される午前側の Pc5 脈動の偏波主軸の方向に特異性があることを指摘している。その特異性は次のような特徴を示す。偏波の回転方向は昭和基地も他の周辺観測点と同一であるが、他の周辺観測点の偏波主軸が磁気北東方向を指すのに対し、昭和基地ではそれらより磁気北方向に際立ってずれる。昭和基地は海岸線近くに位置する観測点であり、偏波主軸方向の向く北側がほぼ海岸線に垂直な方向となっていることから、彼らはこの特異性が海岸線効果 (PARKINSON and JONES, 1979) によるものであると推論している。

海岸線効果などの地下誘導電流による長周期地磁気脈動の偏波特性への局所的な影響は、HUGHES (1974) によって数値計算結果から見積もられている。それによると偏波特性への地下誘導電流の効果は周波数、電気伝導度、そして不連続面の構造などによって大きく変化する。彼等の仮定した電気伝導度の不連続面 (例えば海岸線) の近傍では数 10 km にわたってその効果が及ぶ。

昭和基地の偏波主軸方向の特異性の原因が海岸線効果によるものかどうか、その原因を明らかにするためには昭和基地近傍数 10 km 以内における Pc5 脈動の偏波特性を明確にする必要がある。IWABUCHI *et al.* (1980) が用いた昭和基地から数 100 km 離れた観測点や共役観測点のデータでは、特に共役点は日時や地磁気活動度 (kp) などによって大きく変化するため、その特異性の原因を明らかにするのは不十分である。したがって本研究では、昭和基地に現れる午前側 Pc5 脈動の偏波主軸方向の特異性を、昭和基地、昭和基地から数 10 km の距離にある近傍観測点及び数 100 km 離れた遠方観測点で同時に観測されたデータを用いてより詳しく調査する。

一般に極域などの地磁気高緯度において、Pc5 脈動の偏波や伝搬特性は緯度経度方向に大きな変化を示す。昭和基地の偏波主軸方向の特異性を吟味する上で必要なこれまで明らかにされてきた午前側 Pc5 脈動の偏波特性と伝搬特性の概略を記す。

Pc5 脈動は緯度方向に次のような変化を持つ。1) 位相は低緯度よりも高緯度で遅れる。2) H 成分では振幅が最大となる緯度 (共鳴点) を中心に位相が 180° 変化する特性を持つ。それに対し、 D 成分では 180° ほどの大きな位相変化を持たない。3) 水平面内の偏波の回転方向は、振幅が最大となる緯度を中心に逆転し、中心では直線偏波となる (e.g. WALKER *et al.*, 1979; SOUTHWOOD, 1974; CHEN and HASEGAWA, 1974)。

一方経度方向では、1) 午前と午後で伝搬方向は逆転し、午前では西向き伝搬を示す (OLSON and ROSTOKER, 1978)。2) 水平面内の偏波の回転方向や偏波主軸方向は午前と午後で逆転する

(SAMSON and ROSTOKER, 1972). この時、共鳴点の低緯度側に位置する午前側の観測点では、水平面内の偏波の回転方向は磁力線方向に見て左回りを、偏波主軸方向は地磁気北東方向を指す。

本研究では、同時に多点観測された Pc5 脈動の偏波及び伝搬特性の観測点間の比較から、昭和基地で観測される午前側 Pc5 脈動の偏波主軸方向の特異性を統計的かつ定量的に検討する。

2. 観測データと解析

本研究では、表 1 に示す観測点に設置されたフラックスゲート型磁力計で得られる地磁気変化の H 成分 (磁気南北方向) と D 成分 (磁気東西方向) のデータを用いる。あすか観測拠点 (ASUK) とマラジョージナヤ基地 (MOLO) は昭和基地 (SYOW) からそれぞれ地理的西南西方向に 620, 東方向に 300 km 程度離れており、スカルブスネス (SKRV) と H-100 (H100) は地理的南方向に 50, 南東方向に 80 km 程度離れている。

表 1 観測点の地理、地磁気座標、磁気地方時とコード

Table 1. Geographical and geomagnetic coordinates, magnetic local time, and code for stations.

観測点	コード	地理的		地磁気		MLT (00 UT)
		緯度	経度	緯度	経度	
昭和基地	SYOW	-69.00	39.58	-66.50	71.67	00:09
マラジョージナヤ基地	MOLO	-67.66	45.83	-66.95	78.09	00:33
あすか観測拠点	ASUK	-71.15	24.13	-65.48	58.82	23:19
H-100	H100	-69.29	41.53	-67.02	72.49	00:12
スカルブスネス	SKRV	-69.47	39.62	-66.78	70.98	00:06

Geomagnetic coordinates and magnetic local time is calculated on the basis of IGRF 1985 model.

データサンプリングは定常観測基地の ASUK と MOLO では 2 秒であるが、無人観測システム (Saka *et al.*, 1990) を用いた一時的な観測点の SKRV, H100 と SYOW では 3 秒である。SYOW には定常観測点として 1 秒サンプリングデータもあるが、本研究では SKRV や H100 と同一の無人観測システムによる同時観測データを用いる。そして、ASUK と MOLO の観測データを補間してデータサンプリングを 3 秒に統一して使用する。

本研究で用いた観測期間は無人観測システムが作動していた 1988 年 10 月の 1 ヶ月間である。その期間中から、全点で同時に現れた午前側 Pc5 脈動を選び出す。その後、全観測例に対しスペクトル解析 (AR 法; 次数 20, データ長 20 分) を行い、全観測点でのスペクトルピークにおける Q 値が 2 以上となる観測例を最終的なデータセットとする。

以上の方法により選び出された観測数は 78 例ある。それらの観測例の時刻と周波数の頻度分布を図 1 に示す。図の (a) より脈動は 6–8 UT 頃に卓越し、(b) よりその周波数は 3 mHz 前後に分布することがわかる。これらは一般的な午前側 Pc5 脈動の出現特性を示している (TONEGAWA and FUKUNISHI, 1984; SAMSON *et al.*, 1971)。選び出されたこれらの午前側 Pc5 脈動の

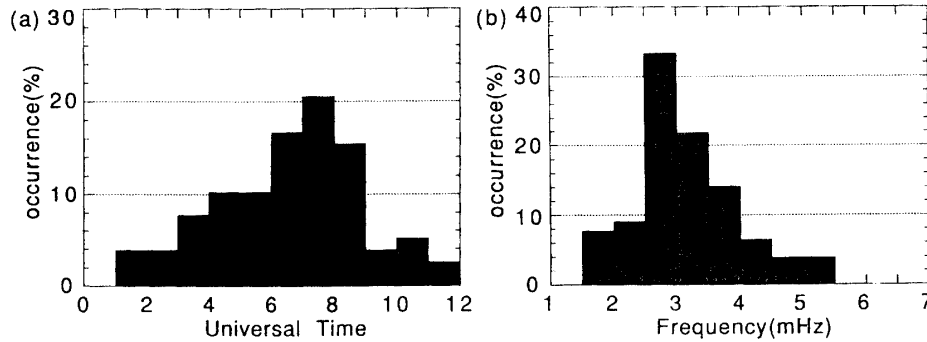


図1 本研究で解析した午前側 Pc5 地磁気脈動発生の時刻別 (a) 及び周波数別 (b) 頻度分布
 Fig. 1. Histograms for occurrence UT (a) and frequency (b) of the morning side Pc5 geomagnetic pulsations events analyzed in this study.

ピーク周波数における H - D 面内の偏平率、偏波主軸方向、位相差、そして観測点間の位相差を導出して統計的に検討する。

3. H - D 成分間の偏波と位相特性

SYOW, MOLO, ASUK で観測された午前側 Pc5 脈動の H - D 面内の偏平率の時刻依存性と頻度分布を図2に示す。表1より ASUK, MOLO は SYOW に対して地磁気地方時 (MLT) に差があるので、以下の時刻依存性は UT を用いて示していく。図2の左図は各観測点での Pc5 脈動の偏平率の 0-12 UT 間における時刻依存性を、右図は各観測点ごとの偏平率の頻度分布を示している。偏平率 0 は線形偏波を、負は左回り偏波を表わしている。この図より、3 観測点共に時刻依存性によって偏平率が変化する傾向は見られない。さらに、3 点共に 80% 以上の確率で正側すなわち左回り偏波に分布している。しかし、その分布は観測点間で相違がある。SYOW と ASUK の偏平率は 0.26 前後に卓越するが、MOLO は 0.20 前後に卓越している。脈動の磁力線共鳴理論より偏平率 0 すなわち線形偏波が共鳴点にあたると考えられることから、これは平均的に見て 3 観測点の中で MOLO が最も共鳴点近くに位置することが多いためと考えられる。

次に、各観測点の偏波主軸方向の特性を図3に示す。ここで偏波主軸方向 0° は磁気北、 90° は磁気東を表す。この図から、MOLO と ASUK の偏波主軸は磁気北東方向に分布する一方で、MOLO と ASUK 間の緯度に位置する SYOW は磁気北方向 0° を中心に頻度は卓越している。3 観測点共に偏波主軸方向の時刻による分布の違いは見られない。ここでは示していないが、ASUK や MOLO では午前と午後で偏波主軸が磁気北東方向から磁気北西方向へ向きを変えていたが、SYOW では向きが変わらず午前と午後で同方向を指していた。

これらの Pc5 脈動の偏波の特徴は、IWABUCHI *et al.* (1980) が示した結果と一致する。さらに、昭和基地における特異性はある特定の観測例だけに現れるのではなくほぼ平均的に見られる。

図4では、各観測点での H - D 成分間の位相差の特徴を示す。この図からも顕著な時刻依存

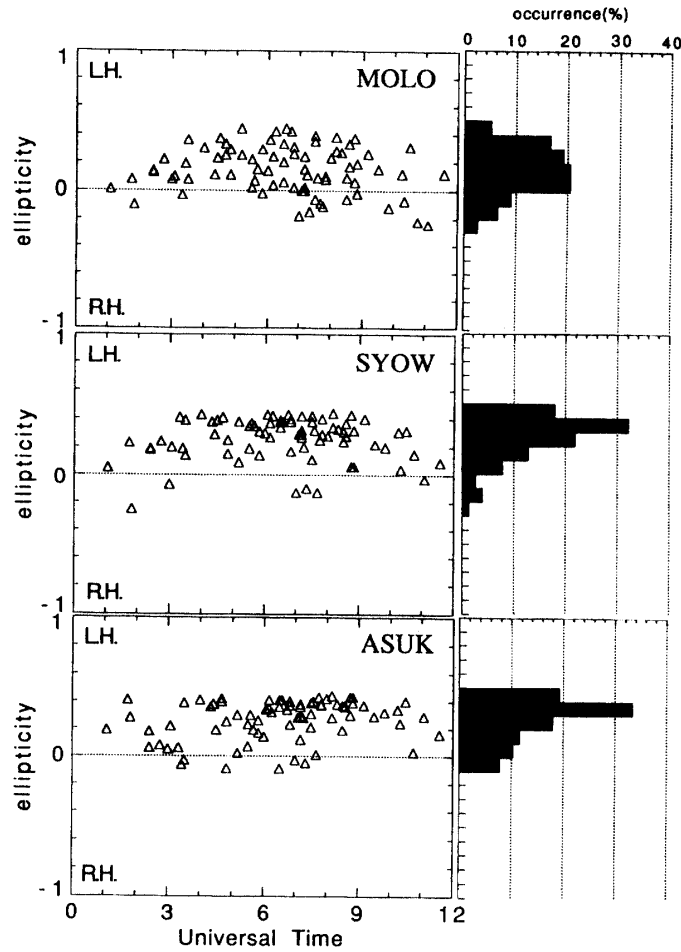


図2 Pc5 脈動の H - D 面内の偏平率の時刻依存性と頻度分布. 上から MOLO, SYOW, ASUK の観測点のデータについて示す. 正側が左回り偏波を示し, ± 1 は円偏波, 0 は直線偏波である.

Fig. 2. Universal time dependence (left side panels) and occurrence probability (right side panels) of ellipticity of morning side Pc5 pulsations in the H - D plane, observed at MOLO (upper panel), SYOW (middle panel), and ASUK (lower panel). The positive of ellipticity indicates the counter-clockwise polarization (CCW). ± 1 indicates circular polarization and 0 linear polarization.

性は見られない. そして, MOLO や ASUK の頻度分布はそれぞれ -30° , -60° に卓越する一方で, MOLO と ASUK 間の緯度に位置する SYOW は -30° と -60° の間の値にはならず -90° 前後で頻度は卓越する. SYOW の位相差だけが ASUK や MOLO の位相差に比べて異なる頻度分布を持つ特徴は, 図3の偏波主軸方向で見られる観測点ごとの頻度分布の相違に一致する.

以上までに SYOW と SYOW から数 100 km 離れた ASUK や MOLO の偏波と位相差を比較することにより, SYOW の偏波主軸方向の特異性の時刻依存性や頻度分布を明確にしてきた. これらの観測点に H100 と SKRV のデータを加えて, 各地点での H - D 面内の偏平率, 偏波主軸方向と位相差を地磁気緯度に対してプロットしたのが図5である. 個々の値は, 各観測点における全観測例の平均値と標準偏差を用いて現わしている. この図から, 次のような特徴

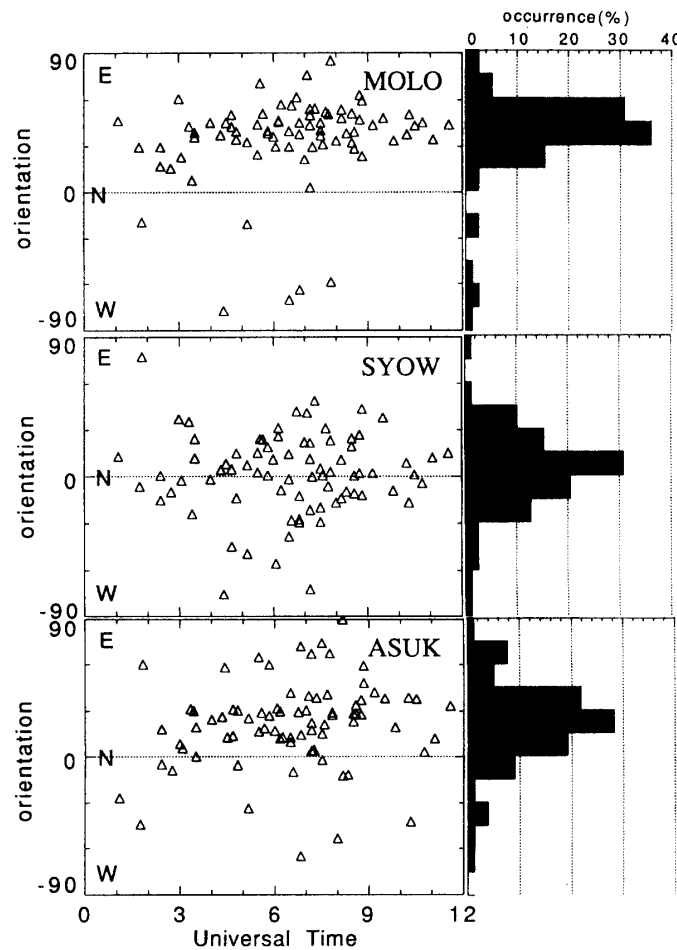


図3 Pc5 脈動の H - D 面内の偏波主軸方向の時刻依存性と頻度分布。様式は図2と同じである。偏波主軸方向 0° , 90° , -90° はそれぞれ磁気北, 東, 西方向を示している。

Fig. 3. Universal time dependence and occurrence probability of the orientation angle of Pc5 pulsations in the H - D plane in the same format as in Fig. 2. 0° , 90° and -90° indicate magnetic north, east, and west, respectively.

が見られる。1) 偏平率は全観測点共に同一の左回り方向を示している。2) 偏波主軸方向は SYOW の他の観測点では磁気北東から磁気北北東方向に向いているのに対し、SYOW では磁気北方向を指している。3) 位相差は、SYOW の他の観測点では $-30^\circ \sim -60^\circ$ を示しているのに対し、SYOW ではそれらの観測点よりもさらに -90° 近くにある。H100 の偏波主軸方向と位相差は MOLO とほぼ同じである。4) H100 から SKRV, SYOW の順に偏波主軸方向は北東から北へ傾き、また位相差は 0° から -90° に近くなる。

さらに図5では大きな緯度変化の様子を見るため、ASUK と MOLO 間 (破線) 及び SYOW, SKRV, H100 の3点での緯度変化 (実線) も示している。両者の偏平率の緯度変化はほぼ同じ傾きであるが、偏波主軸方向と位相差の緯度変化は異なっている。

以上から SYOW で観測される Pc5 脈動の偏波主軸方向が他の周辺観測点に対し北東より北へずれる特性は、 H - D 成分間の位相差が他の周辺観測点より負側にずれていることと関係し

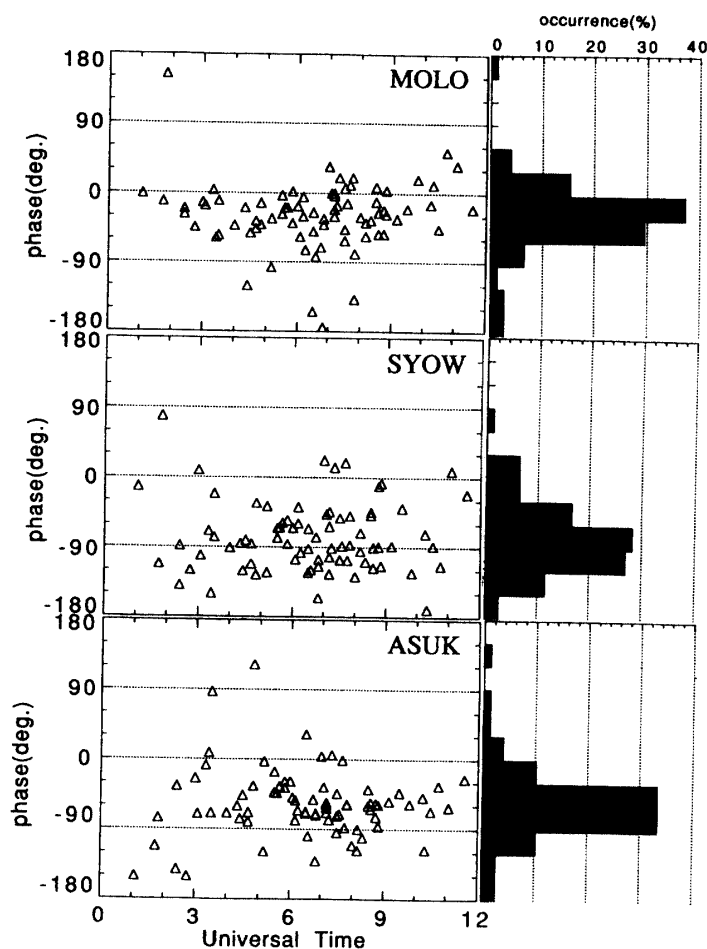


図4 Pc5 脈動の H - D 成分間の位相差の時間依存性と頻度分布。様式は図2と同じである。正側は H 成分に対して D 成分の脈動が遅れていることを示している。

Fig. 4. Universal time dependence and occurrence probability of the phase difference of the H and the D components in the same format as in Fig. 2. A plus sign indicates that the phase of D component lags the H component.

ていると考えられる。

4. H と D 成分の位相変化特性

SYOW の Pc5 脈動の H - D 面内の偏波主軸方向の特異性は、 H - D 成分間の位相差が負側にずれる SYOW 近傍での局所的な変化に関係するものと考えられる。本章では H 成分または D 成分のどちらの位相変化に原因があるのか、そしてどの程度の大きさを持つのかを調べる。

図6は、Pc5 脈動の H と D 成分それぞれの位相変化の緯度依存性を示している。この図で、各観測点の値は SYOW を基準とした観測点間の位相差であり、ここでその値は全観測例の平均値 (Δ) とその標準偏差を用いて表している。

Pc5 脈動は一般的に経度方向で伝搬特性を持ち、位相変化の大きさは経度1度当たり数度程度と言われている (OLSON and ROSTOKER, 1978)。表1に示すように SKRV と H100 の観測点

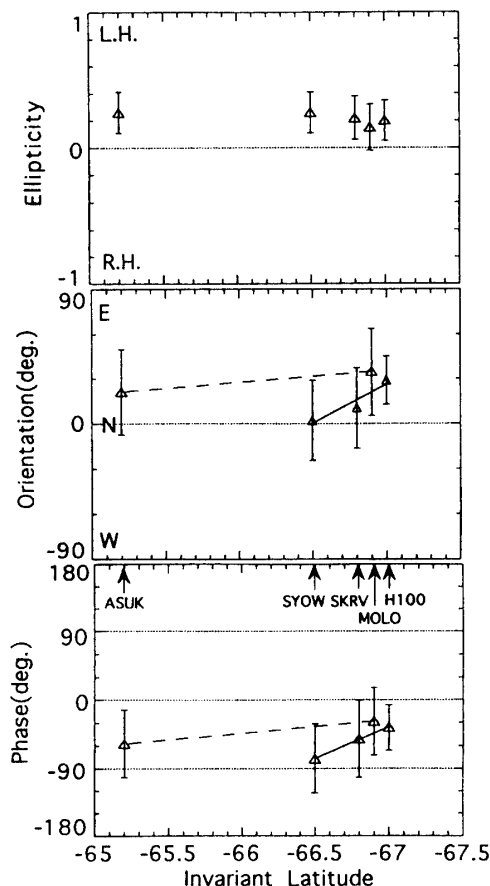


図5 Pc5 脈動の H - D 成分間の (上から) 偏平率、偏波主軸方向、位相差の緯度依存性。三角とバーは平均と標準偏差を表している。点線は MOLO と ASUK 間の位相変化を、実線は SYOW, SKRV と H100 の位相変化の 1 次近似曲線を示している。

Fig. 5. Latitudinal profiles of ellipticity (upper panel), orientation angle (middle panel), and phase difference (lower panel) of morning side Pc5 pulsation. The triangle and the bar indicate the average value and its standard deviation, respectively. The dashed line shows the variation between MOLO and ASUK. The solid line is a linear approximate curve estimated by the least square method for the values at SYOW, SKRV, and H100.

位置は SYOW とほぼ同一地磁気子午面上にあるので、経度方向の伝搬特性から生じる位相変化は無視できると考えられる。それに対し、ASUK と MOLO は SYOW からそれぞれ経度 -12.4° , 6.2° ほど離れているため、SYOW-ASUK 間と SYOW-MOLO 間の位相差 (Δ) には Pc5 脈動が一般的に持つ経度方向の伝搬特性が含まれる。したがって、その位相差 (Δ) から Pc5 脈動の緯度方向の位相変化だけを表わすには、Pc5 脈動の伝搬特性によって生じる SYOW-ASUK 間と SYOW-MOLO 間の経度方向の位相差を除去する必要がある。その経度方向の位相差の補正方法として、ここでは OLSON and ROSTOKER (1978) が示した方位角波数 m 値 (経度 1 度当たりで変化する位相の大きさ) と周波数 f (mHz) の関係式 $m = (1.4 \pm 0.4)f + 0.26$ を用いる。この式から、経度 1 度当たりの位相変化の大きさが推定でき、さらにその大きさと観測点間の経度差から修正する位相変化の大きさを得ることができる。この方法から推定された

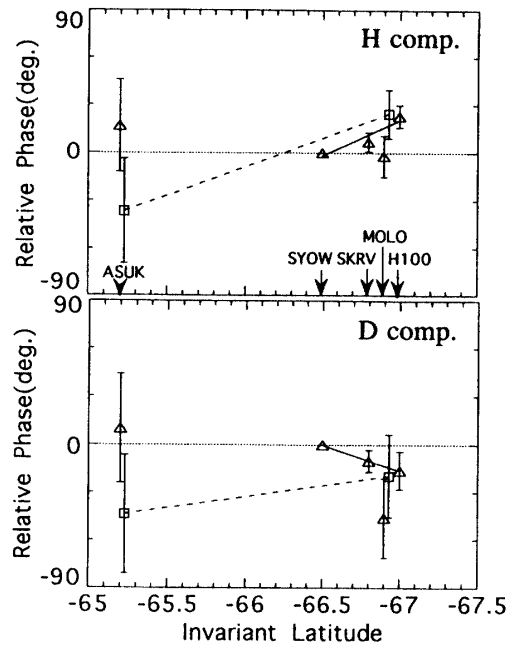


図6 Pc5 脈動の H 成分と D 成分それぞれの位相の緯度変化. 各観測点の値は SYOW に対する位相差を用いて表されている. 正側は観測点の脈動の位相が SYOW よりも遅れていることを示している. 三角とバーは平均と標準偏差を表している. MOLO と ASUK の値について経度方向の位相変化分を補正した位相が四角で表されている. 補正方法は文章中に記述する. 点線は MOLO と ASUK 間の位相変化を, 実線は SYOW, SKRV と H100 の位相変化の 1 次近似曲線を示している.

Fig. 6. Latitudinal phase variations of the H component (upper panel) and the D component (lower panel) of Pc5 pulsations. The value is the phase difference between SYOW and each station. A plus sign means phase lag. The triangle and the bar show the average value and its standard deviation, respectively. The square indicates the calculated phase of MOLO and ASUK as a function of the latitude in the same meridian as SYOW. The dashed line shows the phase variations between MOLO and ASUK. The solid line shows a linear approximate curve calculated by the least square method from the values at SYOW, SKRV, and H100.

Pc5 脈動の伝搬特性によって生じる経度方向の位相差を SYOW-ASUK 間と SYOW-MOLO 間それぞれの位相差の平均値 (Δ) から除去する. そして, 図6では修正された平均値を□で表わしている. その修正後の緯度方向の位相変化の特徴について簡単に考察する. ASUK と MOLO の修正された平均値間の位相変化 (点線) から, H と D 成分共に低緯度より高緯度で位相が遅れる. そして, この緯度方向の位相変化は D 成分よりも H 成分が大きい, その大きさは H 成分で緯度 1 度当たり約 30° , D 成分で約 10° である. この位相変化は, これまでに示されてきた Pc5 脈動の緯度方向の伝搬特性の研究結果 (e.g. POULTER, 1982; SAKA *et al.*, 1982; KATO *et al.*, 1994) とよく一致する. すなわち, 図に示されている ASUK と MOLO 間の修正された緯度方向の位相変化 (点線) は, Pc5 脈動の緯度方向の位相変化によく合うと考えられる.

Pc5 脈動の緯度方向の位相変化 (点線) を基にすると, SYOW 近傍 3 点の Pc5 脈動の H 成分と D 成分の位相の進み遅れの変化は, 次のような特徴を示している. Pc5 脈動の H 成分の位

相の進みの大きさは、SYOW, SKRV, H100 一様に約 10° である。ところが、 D 成分の位相の遅れの大きさは SYOW で 30° 、SKRV で 10° 、そして H100 でほぼ 0° である。この緯度方向の位相変化の傾きから、各観測点間の H - D 成分間の位相差の変化 (図 5) には、 D 成分の位相変化が寄与していると考えられる。

5. 考 察

これまでの解析結果から SYOW で現れた午前側 Pc5 脈動の H - D 面内の偏波主軸方向の特異性は、Pc5 脈動の D 成分の位相変化に関係することが推察される。しかし、偏波主軸方向の変化は位相差だけでなく振幅比の影響も受けることが考えられる。ここでは、偏波主軸方向の特異性への H - D 成分間の振幅比の影響を簡単に考察する。 H - D 成分間の振幅比の緯度依存性を図 7 に示す。この図から、全観測点の H - D 成分間の振幅比の分布はほぼ同じで、特に

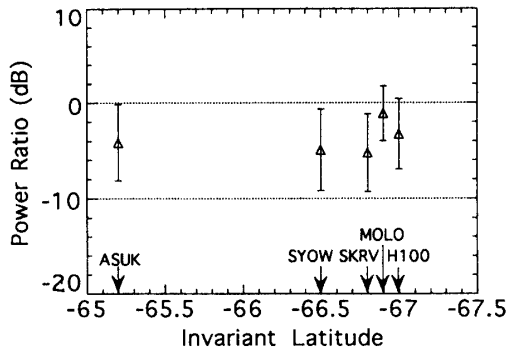


図 7 Pc5 脈動の H - D 成分の振幅比の緯度変化。様式は図 5 と同じである。正側は H 成分の脈動の振幅よりも D 成分の方が大きいことを示している。

Fig. 7. Latitudinal variations of the amplitude ratio of the H and D components of Pc5 pulsations in the same format as in Fig. 5. A plus sign indicates that the amplitude of the D component is larger than that of the H component.

SYOW だけが異なっていることはない。したがって、SYOW の偏波主軸方向の特異性は H - D 成分間の振幅比による影響は極めて少ないと考えられる。

次に、偏平率、偏波主軸方向と位相差、そしてそれに対するスペクトル密度の関係式を用いて、SYOW で現れた H - D 成分間の偏波主軸方向の特異性が位相差の変化によって起こり得るか考察する。

2次元の定常時系列を $x(t)$, $y(t)$ とし、それらの自己スペクトル密度を P_{xx} , P_{yy} , そして相互スペクトル密度を $P_{xy} (= K_{xy} - iQ_{xy})$, P_{yx} とする時、偏平率 ($\tan |\beta|$) と偏波主軸方向 (ψ) は次式で表わされる (RANKIN and KURTZ, 1970)。

$$\beta = \frac{1}{2} \sin^{-1} \left(\frac{2 Q_{xy}}{P_{xx} + P_{yy}} \right), \quad (1)$$

$$\psi = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{2 K_{xy}}{P_{xx} - P_{yy}} \right). \quad (2)$$

さらに、位相差 (θ) は上式の偏平率と偏波主軸方向を用いると、

$$\begin{aligned}\theta &= \tan^{-1} \left(\frac{Q_{xy}}{K_{xy}} \right), \\ &= \tan^{-1} \left(\frac{P_{xx} + P_{yy}}{P_{xx} - P_{yy}} \cdot \frac{\sin(2\beta)}{\tan(2\psi)} \right),\end{aligned}\quad (3)$$

である。

この式 (3) に、午前側 Pc5 脈動の特性に一致する条件を与えて、考察を行う。午前側の Pc5 脈動の回転方向は磁力線方向に見て左回りであるので、偏平率 $\beta > 0$ となる。図 7 でも明らかであるが、午前側 Pc5 脈動の H 成分の振幅は D 成分よりも大きい。これは $P_{xx} > P_{yy}$ を表わし、

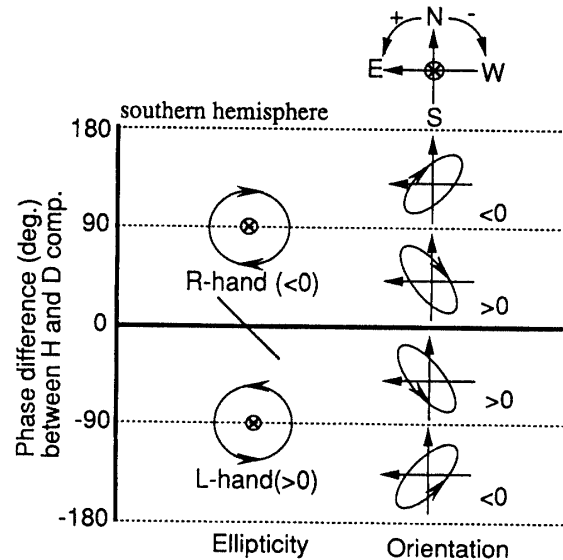


図 8 午前側 Pc5 脈動の H - D 成分の位相差と偏波特性 (偏平率と偏波主軸方向) の関係

Fig. 8. Relationship between the phase difference and the polarization (ellipticity and orientation angle) of the H and D components of morning side Pc5 pulsations.

式 (2) より偏波主軸方向 $|\psi| < 45^\circ$ となる。これらの 2 条件を用いて、位相差に対する偏波主軸方向と偏平率の関係を表したのが図 8 である。この図より、位相差が -90° を境に、左回りの偏波の回転は変わらずに偏波主軸方向が磁気北東から磁気北西へと大きく変わり得ることが明らかである。負側のずれは H 成分の位相が進むか D 成分が遅れる位相変化に相当する。これまでの結果から見て SYOW で観測される Pc5 脈動の偏波主軸方向の特異性には、 D 成分の位相遅れが寄与していると考えるのが適当である。

SYOW 近傍観測点の偏波特性の比較において、 D 成分の位相変化は H100, SKRV, SYOW となるほど大きくなる。このような局所的な位相変化を起こす要因としては、電離層電気伝導度の非一様性、例えば日照効果やオーロラ粒子降り込みなど、によってもたらされる効果 (GLASSMEIER, 1984; SAKA and ALPEROVICH, 1993), または SYOW や SKRV は海岸線に近いことか

ら地下の局所的な電気伝導度の不連続構造による不均質な誘導電流の効果が考えられる。

日照効果は顕著な時刻依存性を持ち、粒子降下は特定の観測例に限られることが多い。しかし図3や図4より明らかなように、SYOWで現れるPc5脈動の H - D 面内の偏波主軸方向の特異性は時刻依存性を持たず、さらにその特異性は特定の観測例にかかわらず現れている。すなわちSYOWで観測されるPc5脈動の偏波主軸方向の特異性の原因として、時刻依存性や特定の観測例に大きく依存しないとされるSYOW近傍での地下の誘導電流であると考えるのが妥当である。

SKRVはSYOWと同じ D 成分の位相が遅れる特徴を持つ(図6)ことから、SKRVでもSYOWと同じ影響を受けていると考えられる。しかし、その影響はSYOWに比べると小さいものである。さらにH100は海岸線から約80 km離れた地点にあり、HUGHES (1974)の結果を用いると地下誘導電流の効果はほとんど無視できるぐらいに小さいと考えられる。そのような特徴は図6でも明らかであり、SKRVに比べてH100での位相変化は非常に小さい。

次に、HUGHES (1974; Fig. 1)の数値計算結果を参考にして、地下誘導電流の効果について考察する。その図で地下誘導電流の効果は次のような特徴を持つ。地上の電気伝導度の不連続点(まさに海岸線)より高電気伝導度の構造から離れるほど、1秒の周期を除いた脈動の位相は大きく変化する。それに対して、振幅の大きさはほとんど変化しない。位相はその不連続点で最も遅れ、構造から離れるほど位相は進んでいく。これらは本研究のH100, SKRV, SYOWの地理的な変化に現われた脈動の D 成分の特徴に非常によく似ている。

HUGHESのFig. 1では海にあたる高電気伝導度の値は0.1 (S/m)となっているが、実際の海水の電気伝導度は約3 (S/m)程度である。この電気伝導度の値の違いによってその位相変化の様子は当然変ってくる。彼のモデル計算から3 (S/m)の時の位相変化の影響を単純に推測するには、電気伝導度を0.1から3 (S/m)に変えた時、同じskin depthを持つ周期の位相変化曲線に注目すれば、それは可能になる。例えば0.1 (S/m)で周期10 (s)の変化を表わしている曲線ならば、3 (S/m)の時にその曲線は300 (s)の周期のものにあたると考えられる。したがって、HUGHESのFig. 1の高電気伝導度にあたる領域を海水と同じ電気伝導度に置き換えて考えると、不連続近傍でのPc5の周期(150–600 s)における位相の大きさは約 15° に見積もられる。この大きさはSYOWの D 成分で見られた位相遅れの大きさ 30° の半分であり、SKRVでの D 成分の位相遅れより少し小さい。しかし、より正確な電気伝導度の構造を用いればこれらの値はさらに近づくと考えられ、地下の局所的な電気伝導度の不連続構造による不均質な地下誘導電流の効果が D 成分の位相変化に大きく影響を与えていると推測される。

このような脈動の振幅位相変化が D 成分に現われるためには、地下電気伝導度の不連続が磁気東西方向になければならない。そして、 D 成分の位相変化がH100, SKRV, SYOWとなるほど大きくなる地理的な変化を持っていたことから、SYOW近傍にその不連続構造が存在すると予想される。

Pc5 脈動の偏波主軸方向の特異性の原因は局所的な地下誘導電流によるものであるが、地下電気伝導度のどのような構造が効いているのかは明確でない。今後の課題として、新たな近傍観測点データや地下の構造を仮定した数値計算による解析を行い、定量的にそれらを明らかにしていくことが重要である。

6. ま と め

本研究では、昭和基地を含め、昭和基地から数 10 km 離れたスカルブスネスと H-100、そして数 100 km 離れたあすか観測拠点とマラジョージナヤ基地における多点同時観測データを用いて、昭和基地で観測される午前側 Pc5 地磁気脈動の偏波主軸方向の特異性を検討した。この結果、次のような昭和基地の偏波主軸方向の特異性が明らかとなった。

- (1) Pc5 脈動の午前側の偏波主軸方向の特異性は局所的に現れ、時刻に依存しない。
- (2) その特異性は H - D 成分間の位相差の変化、特に D 成分の位相変化によるものと推論される。
- (3) 昭和基地で現れる位相変化は、理論推定値より D 成分で 30° の遅れ、 H 成分で 10° の進みを持つ。
- (4) 偏波主軸方向の特異性をもたらす原因は、昭和基地近傍における局所的な地下誘導電流の効果であると予想される。

昭和基地で局所的に現れる Pc5 脈動の位相変化を考慮することによって、昭和基地と他観測点の位相差から推測される脈動の伝搬特性のより正確な値を知ることが可能になる。

謝 辞

本研究は、第 28 次南極観測隊によって得られた南極昭和基地、マラジョージナヤ基地、あすか観測拠点の超高層定常観測データ、また昭和基地周辺で行われた無人観測データを使用した。それらの貴重なデータを提供して頂きました国立極地研究所超高層物理部門の方々と九州大学坂助教授に深く感謝致します。そして、研究全般にあたり長年ご指導頂きました国立極地研究所佐藤教授、東海大学故青山教授、桜井教授、利根川助教授に心より深く感謝致します。また、本研究におけるデータ解析はすべて国立極地研究所情報科学センターの計算機を利用して行いました。センター関係者のご協力に感謝致します。

文 献

- CHEN, L. and HASEGAWA, A. (1974): A theory of long-period magnetic pulsation. 1. Steady state excitation of field line resonance. *J. Geophys. Res.*, **79**, 1024–1032.
- GLASSMEIER, K.-H. (1984): On the influence of ionospheres with non-uniform conductivity distribution on hydromagnetic waves. *J. Geophys.*, **54**, 125–137.
- HUGHES, W. J. (1974): The polarization of micropulsations and geo-electric structure. *Geophys. J. R. Astron.*

- Soc., **38**, 95–117.
- IWABUCHI, M., FUKUNISHI, H. and SATO, N. (1980): Spectral and polarization characteristics of Pc3–5 magnetic pulsations observed at the Syowa Station-Iceland conjugate pair. *Nankyoku Shiryô (Antarct. Rec.)*, **68**, 294–310.
- KATO, K., SATO, N. and TONEGAWA, Y. (1994): Estimation of geomagnetic conjugate points using Pc5 geomagnetic pulsation. *J. Geomagn. Geoelectr.*, **46**, 363–372.
- OLSON, J.V. and ROSTOKER, G. (1978): Longitudinal phase variation of Pc4–5 micropulsations. *J. Geophys. Res.*, **83**, 2481–2488.
- PARKINSON, W.D. and JONES, F.W. (1979): The geomagnetic coast effect. *Rev. Geophys. Space Phys.*, **17**, 1999–2015.
- POULTER, E. M. (1982): Pc5 micropulsation resonance region observed with the STARE radar. *J. Geophys. Res.*, **87**, 8167–8173.
- RANKIN, D. and KURTZ, R. (1970): Statistical study of micropulsation polarizations. *J. Geophys. Res.*, **75**, 5444–5458.
- SAKA, O. and ALPEROVICH, L. (1993): Sunrise effect on dayside Pc pulsations at the dip equator. *J. Geophys. Res.*, **98**, 13779–13786.
- SAKA, O., KIM, J.S. and SUGIURA, M. (1982): A cross spectral analysis of high-latitude Pc5 pulsations in the morning sector. *J. Geophys. Res.*, **87**, 9129–9134.
- SAKA, O., SATO, N. and UCHIDA, S. (1990): Development of unmanned magnetometer stations for use in Antarctica. *Antarct. Sci.*, **2**, 335–361.
- SAMSON, J.C. and ROSTOKER, G. (1972): Latitude-dependent characteristics of high-latitude Pc4 and Pc5 micropulsations. *J. Geophys. Res.*, **77**, 6133–6144.
- SAMSON, J.C., JACOBS, J.A. and ROSTOKER, G. (1971): Latitude-dependent characteristics of long-period geomagnetic pulsations. *J. Geophys. Res.*, **76**, 3675–3682.
- SOUTHWOOD, D.J. (1974): Some feature of field line resonance in the magnetosphere. *Planet. Space Sci.*, **22**, 483–491.
- TONEGAWA, Y. and FUKUNISHI, H. (1984): Harmonic structure of Pc3–5 magnetic pulsations observed at the Syowa-Husafell conjugate pair. *J. Geophys. Res.*, **89**, 6737–6748.
- WALKER, A.D.M., GREENWALD, R.A., STURAT, W.F. and GREEN, C.A. (1979): STARE auroral radar observations of Pc5 geomagnetic pulsations. *J. Geophys. Res.*, **84**, 3373–3388.

(1995 年 10 月 17 日受付; 1995 年 12 月 8 日改訂稿受理)